植物生态学报 2016, **40** (3): 0–0 doi: 10.17521/cjpe.2015.1102
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

基于遥感和空间分析的上海城市森林生物量分布特征

王紫君[1] 申广荣[1,3*] 朱 赟[1] 韩玉洁[4] 刘春江[2,3] 王 哲[4] 薛春燕[4]

[1]上海交通大学农业与生物学院和低碳农业研究中心, 上海 200240; [2]国家林业局上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240; [3]农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240; [4]上海林业总站, 上海 200072

摘 要 城市森林发挥着改善和维护城市生态环境质量的作用, 研究城市森林生物量和分布特点对其生态系统服务评价和林分经营均具有重要意义。该文根据上海城市森林的种植分布和经营状况利用2011年6月–2012年6月样地实测森林生物量数据和同期Landsat ETM+遥感图像, 在基于逐步回归分析建立森林生物量反演模型的基础上, 引入回归残差及空间分析, 研究了城市森林及其主要优势树种樟(*Cinnamomum camphora*)林分的生物量分布特征, 探讨了区域尺度森林生物量的遥感估测方法。结果表明: (1)上海城市森林生物量密度总体呈现中心城区(静安区、黄浦区等)较高, 生物量密度集中在35–70 t·hm^{-2}之间, 郊区(嘉定区、青浦区等)空间分布状况相对较低, 生物量密度介于15–50 t·hm^{-2}之间的变化特征。上海优势树种樟林分生物量密度范围为20–110 t·hm^{-2}; 空间上呈现出东北部较高、西南部较低的变化特征。(2)上海城市森林及樟林分的生物量总量分别为3.57 Tg和1.33 Tg。林地面积小, 具有较高森林生物量密度的上海中心城区, 其森林生物量占总量的6.1%, 其中林地面积最小的静安区生物量最低, 仅占总量的0.11%。在所有区县中, 林地面积最大的崇明县、浦东新区具有较高的森林生物量, 分别占总量的20.08%和19.18%。(3)所建立的基于回归反距离插值的城市森林生物量估测模型, 其标准误差、平均绝对误差、平均相对误差分别为8.39、6.86、24.22%, 较回归模型分别降低了57.69%、55.43%、64.00%, 较空间插值的方法分别降低了62.21%、58.50%、65.40%。残差的引入减少了由于空间变异引发的城市森林生物量遥感估测的不确定性。相比基于实测数据通过空间插值的估测, 遥感为快速便捷、客观高效的森林生物量监测提供了可能, 更加完善的结果和模型的优化有待引入其他信息源如高分高光谱信息或改善残差空间分析方法获得。

关键词 生物量; 樟; ETM+图像; 回归分析; 残差

引用格式: 王紫君, 申广荣, 朱赟, 韩玉洁, 刘春江, 王哲, 薛春燕 (2016). 基于遥感和空间分析的上海城市森林生物量分布特征. 植物生态学报, 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe.2015.1102

Research on characteristics of biomass distribution in urban forests of Shanghai metropolis based on remote sensing and spatial analysis

WANG Zi-Jun[1] , SHEN Guang-Rong[1,3*], ZHU Yun[1], HAN Yu-Jie[4] , LIU Chun-Jiang[2,3], WANG Zhe[4], and XUE Chun-Yan[4]

[1]Centre for Low Carbon Agriculture, School of Agriculture and Biology and Research, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; [2]Shanghai Urban Forest Ecosystem Research Station of National Positioning and Observation, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China; [3]Key Laboratory of Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China; and [4]Shanghai Forestry Station, Shanghai 200072, China

Abstract

Aims Monitoring and quantifying the biomass and its distribution in urban trees and forests are crucial to understanding the role of vegetation in an urban environment. In this paper, an estimation method for biomass of urban forests was developed for the Shanghai metropolis, China, based on spatial analysis and a wide variety of data from field inventory and remote sensing.

Methods An optimal regression model between forest biomass and auxiliary variables was established by stepwise regression analysis. The residual value of regression model was computed for each of the sites sampled and interpolated by Inverse-distance weighting (IDW) to predict residual errors of other sites not subjected to sampling. Forest biomass in the study area was estimated by combining the regression model based on remote sensing image data and residual errors of spatial distribution map. According to the distribution of plantations and

收稿日期Received: 2015-03-23 接受日期Accepted: 2015-10-24

* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: sgrong@sjtu.edu.cn)

management practices, a total of 93 sample plots were established between June 2011 and June 2012 in the Shanghai metropolis. To determine a suitable model, several spectral vegetation indices relating to forest biomass and structure such as normalized difference vegetation index (*NDVI*), ratio vegetation index (*RVI*), difference vegetation index (*DVI*), soil-adjusted vegetation index (*SAVI*), and modified soil-adjusted vegetation index (*MSAVI*), and new images synthesized through band combinations such as the sum of TM2, TM3 and TM4 (denoted Band 234), and the sum of TM3, TM4 and TM5 (denoted Band 345) were used as alternative auxiliary parameters .

Important findings The biomass density in urban forests of the Shanghai metropolis varied from 15 to 120 t·hm^{-2}. The higher densities of forest biomass concentrated mostly in the urban areas, e.g. in districts of Jing'an and Huangpu, mostly ranging from 35 to 70 t·hm^{-2}. Suburban localities such as the districts of Jiading and Qingpu had lower biomass densities at around 15 to 50 t·hm^{-2}. The biomass density of *Cinnamomum camphora* trees across the Shanghai metropolis varied between 20 and 110 t·hm^{-2}. The spatial biomass distribution of urban forests displayed a tendency of higher densities in northeastern areas and lower densities in southwestern areas. The total biomass was 3.57 million tons (Tg) for urban forests and 1.33 Tg for *C. camphora* trees. The overall forest biomass was also found to be distributed mostly in the suburban areas with a fraction of 93.9%, whereas the urban areas shared a fraction of only 6.1%. In terms of the areas, the suburban and urban forests accounted for 95.44% and 4.56%, respectively, of the total areas in the Shanghai metropolis. Among all the administrative districts, the Chongming county and the new district of Pudong had the highest and the second highest biomass, accounting for 20.1% and 19.18% of the total forest biomass, respectively. In contrast, the Jing'an district accounted for only 0.11% of the total forest biomass. The root-mean-square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and mean relative error (MRE) of the model for estimating urban forest biomass in this study were 8.39, 6.86 and 24.22%, respectively, decreasing by 57.69%, 55.43% and 64.00% compared to the original simple regression model and by 62.21%, 58.50%, 65.40% compared to the spatial analysis method. Our results indicated that a more efficient way to estimate urban forest biomass in the Shanghai metropolis might be achieved by combining spatial analysis with regression analysis. In fact, the estimated results based on the proposed model are also more comparable to the up-scaled forest inventory data at a city scale than the results obtained using regression analysis or spatial analysis alone.

Key words biomass; *Cinnamomum camphora;* ETM+ image; regression analysis; residual

Citation: Wang ZJ, Shen GR, Zhu Y, Han YJ, Liu CJ, Wang Z, Xue CY (2016). Research on characteristics of biomass distribution in urban forests of Shanghai metropolis based on remote sensing and spatial analysis. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1–1. doi: 10.17521/cjpe.2015.1102

城市森林是全球森林生态系统的一个重要组成部分，在改善和维护城市环境质量、为城市居民提供生态服务功能方面发挥着重要作用，具有重要的社会和经济功能(Woodwell *et al*., 1978)。城市森林生物量是一个城市森林生态系统碳储量、固碳能力的重要参数，对其分布格局的分析和准确估测具有重要的理论和实践意义。作为我国城市化水平最高的国际化大都市，上海市城市森林近年来得到了快速发展，但仍然存在着森林需求大、覆盖率较低、分布不均匀、破碎化程度高等问题(Wang *et al*., 2013)。采用先进技术开展城市森林生物量估测及其分布格局研究，不仅可为上海城市森林经营提供理论依据，而且也可为新技术探索和应用提供一个机会。

随着信息技术的飞速发展和3S技术的广泛应用，利用遥感信息和GIS技术进行森林生物量的估算及碳过程的研究已经成为一种全新的手段和重要方法。为了对森林生物量进行更精确的估测与研究，各类传感器(Wang & Qi, 2008; Hall *et al*., 2011; Asner *et al*., 2012)、图像处理方法(Antonarakis *et al*., 2011; Eckert *et al*., 2011; Barbosa *et al*., 2014a)、生物量模型以及不确定性评估方法在不断开发利用的同时(Barbosa *et al*., 2014b)，以不同传感器及其遥感数据与森林清查或野外调查数据为基础，分析研究森林生物量与遥感数据的关系及其参数或非参数分析，进而建立线性或非线性模型成为人们关注的热点(Barbosa *et al*., 2014b; Manna *et al*., 2014)。

城市森林具有空间分布格局与其城市区域功能需求复杂的耦合特点，决定其生物量的环境因子和生物因子多种多样，在这种情况下单一的遥感信息或简单的线性关系模型很难准确反映生物量的变化

(刘常富等, 2008)。这是由于遥感信息参数与生物量拟合关系方法的关键是基于样点观测数据建立遥感信息参数与森林生物量之间的关系模型, 但不同的森林植被, 因为树种、林龄以及所处地理环境等方面的差异, 会导致生物量与遥感信息参数之间相关性的差异, 所以会引发对森林生物量估算的不确定性(徐新良和曹明奎, 2006)。Ren等(2012)利用不同时间序列的城市森林清查资源与TM数据, 建立了厦门市中心城区、郊区、远郊3种地块的森林生物量模型。研究分析发现: 不同森林地块由于其不同植被分布情况生物量估测会有较大的差异。另外, 由于受生物量的高度空间异质性的影响, 尽管遥感数据能够有效地反映植被的空间差异, 在估算生物量空间分布格局方面具有优势, 但受遥感数据本身的误差及遥感模型中关键参数的不确定性等因素的制约, 单纯的遥感方法误差较大(Lu, 2006; 刘双娜等, 2012)。Zhu和Liu (2015)在对美国俄亥俄州东南部地上部分生物量的研究中, 结合不同季节时间序列的归一化植被指数(*NDVI*), 经过4种参数分析与两种非参数分析方法, 建立了*NDVI*与生物量的6种经验模型, 证明简单地使用遥感方法会导致遥感信息过饱和与模型估测精度较低的情况。因此, 针对具有个体斑块面积小、分散度高、分布不匀特征的上海城市森林, 探索基于遥感信息和空间分析的城市森林生物量估测的有效方法具有重要的科学意义。在此基础上, 进一步分析与讨论上海城市森林主要优势树种(如樟(*Cinnamomum camphora*)林分占林地总面积的27.7%, 其他林分均不超过10% (王哲, 2012))的空间分布状况, 对了解上海城市森林现状和有效的经营管理更具现实意义。

本研究基于森林样地调查实测数据, 以同期Landsat ETM+影像各波段地表反射率、植被指数与波段组合数据作为信息源, 通过回归分析和空间分析, 探讨研究上海城市森林(包括樟林分)及其优势树种樟林分生物量的空间分布特征和有效的遥感估测方法, 为动态监测城市森林生物量的空间分布格局和经营管理提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

上海位于我国长江入海口处(120.87°–122.20° E, 30.67°–31.88° N), 属北亚热带季风性气候, 雨热同期, 日照充分, 雨量充沛, 年平均气温15.8 ℃, 年降水量1 100 mm, 平均海拔4 m。地处长三角都市圈中心地区, 作为我国典型的国际化大都市和经济商业中心, 上海也是我国大陆地区城市化水平最高(城市化率达到89%)和人口密度最大(3 000人·km^{-2})的城市。总面积约为63.4万hm^2, 2009年上海地区林地总面积为9.9万hm^2, 2014年森林覆盖率已达到14%, 比1999年增加了10.83%, 森林面积翻了近两番。但由于污染严重, 环境压力大, 居民游憩空间缺乏, 因此对城市森林生态系统服务的需求较高。

上海城市森林主要以亚热带常绿阔叶林和水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)林、竹林、经济林为主(http://www.shgtj.gov.cn/)。目前, 在森林群落中常见乔木约68种, 小乔木及灌木约105种。上海城市森林分布特点为城郊地区分布广、城区森林面积小。2009年郊区林地总面积约为95 249 hm^2, 中心城区林地总面积为3 787 hm^2, 只为郊区林地面积的4%。上海地区人工林占较大比例, 且其中以人工幼龄林(< 15年)所占比重最大(85%)。截至2012年, 在所有森林林分类型中, 樟纯林的总面积为27 447.1 hm^2, 占上海林地总面积的27.7%, 且绝大多数为幼龄林, 而其他林分均不超过林地总面积的10%, 因此是最主要的优势树种(王哲, 2012)。这种个体斑块面积小、分散度高、分布不匀, 大部分呈片状(生态片林、森林公园)或带状(外环林带、沿河流水源涵养林)分布、普遍为稀疏种植的林地或小面积的人工绿化群落的上海城市森林具有与自然森林明显不同的特点(沈烈英, 2008; 张凯旋, 2010), 反映了上海当前“见缝插针”式的森林绿化构造。同时, 由于每块林地的面积小、破碎度高, 为基于遥感信息生物量估测增加了较多复杂性(徐飞等, 2010)。

1.2　数据采样调查与分析

本研究所用的实测森林生物量是指乔木层及竹子生物量, 包括根、干、皮、枝、叶的总生物量。依据土壤、人工林分布和经营状况等特点, 首先将上海林地进行类型划分, 选择出具有代表性的、易到达的、单一林分的、林分密度均匀的样地。其次对每种林分类型设置固定样地并进行调查, 每块样地的地理位置均由GPS仪实测获得。本研究共设立了93个固定林分样地, 其中樟纯林样地共设15个, 且全部是幼龄林。样地遍布包括崇明岛在内的13个区县(图1), 涵盖上海主要林分类型, 樟林、水杉林、

doi: 10.17521/cjpe.2015.1102

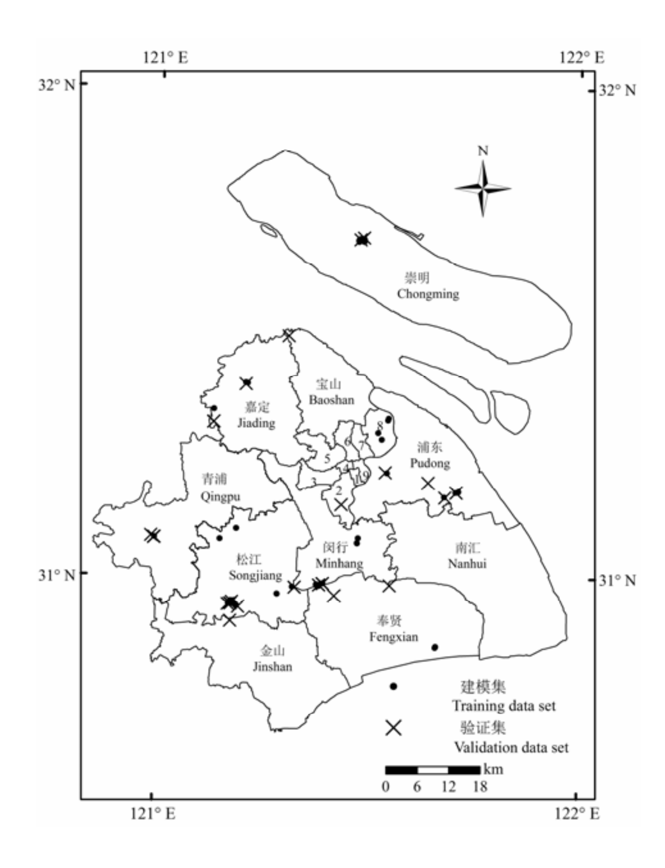


图1 研究区样地分布图。图中的1–9为上海中心城区, 分别代表: 卢湾、徐汇、长宁、静安、普陀、闸北、虹口、杨浦和黄浦区。

Fig. 1 The map of sample plot distributions. Numbers 1–9 represent the nine districts in the central city, namely Luwan, Xuhui, Changning, Jing'an, Putuo, Zhabei, Hongkou, Yangpu and Huangpu, respectively.

全缘叶栾树(*Koelreuteria bipinnata* var. *integrifoliola*)林、毛竹(*Phyllostachys edulis*)林、银杏(*Ginkgo biloba*)林、山杜英(*Elaeocarpus sylvestri*)林、池杉(*Taxodium distichum* var. *imbricatum*)林、意大利'I-214'杨(*Populus* × *canadensis* 'I-214')林、荷花玉兰(*Magnolia grandiflora*)林、无患子(*Sapindus saponaria*)林、女贞(*Ligustrum lucidum*)林、枫香树(*Liquidambar formosana*)林和阔叶混交林(broadleaved mixed forest)等(表1)。样地大小为20 m × 30 m或20 m × 50 m。样地调查及采样时间集中于2011年6月至2012年6月。根据林分生长特点, 主要对样地林分进行了胸径、树高、活枝下高、冠幅的调查和群落学调查。采用"径阶标准木法", 以2 cm为径阶(特殊树种如意大利214杨以5 cm为1个径阶), 统计各林分内各径阶株数, 在各径阶内选取1–2株作为标准木, 一般每种树种选择5–8株标准木, 采用"全挖法"挖取标准木, 按根、干、枝、叶分别取样, 带回实验室进行烘干称重, 获得各树种各标准木干物质质量。以胸径作为表征生物量的相关参数, 建立了12个主要树种全立木及各组分(根、干、皮、枝、叶)生物量方程, 所构建的生物量方程的决定系数均在0.9以上($p < 0.01$)(王哲, 2012)。根据各树种生物量方程估算各样地生物量。

上海城市森林生物量遥感估测模型的构建, 基

表1 不同林分样地信息

Table 1 Information on sampling plots of different forest types

林分类型 Forest type	样地数 Number of plots	平均胸径 Mean *D* (cm)	平均树高 Mean tree height (m)	林龄 Stand age (a)
樟 *Cinnamomum camphora*	15	7.8–21	5.4–13.6	12–18
水杉 *Metasequoia glyptostroboides*	18	8.5–28.7	8.5–28.54	11–50
枫香树 *Liquidambar formosana*	2	9.2–12.8	7.9–10.3	12–30
池杉 *Taxodium distichum* var. *imbricatum*	4	9.4–17.3	8.0–14.6	12–30
无患子 *Sapindus saponaria*	3	8.3–8.8	6.7–7.7	12
全缘叶栾树 *Koelreuteria bipinnata* var. *integrifoliola*	3	8.9–9.5	8.6–8.8	12
女贞 *Ligustrum lucidum*	3	10.0–10.9	7.7–8.6	12
银杏 *Ginkgo biloba*	6	6.5–13.8	2.6–6.4	12–25
山杜英 *Elaeocarpus sylvestri*	7	10.7–13.6	6.6–8.4	11
荷花玉兰 *Magnolia grandiflora*	6	7.5–10.2	4.4–5.7	8–12
毛竹 *Phyllostachys edulis*	5	8.0–9.3	11.2–11.8	2
意大利的'I-214'杨 *Populus* × *canadensis* 'I-214'	3	14.9–17.7	11.6–14.5	12
阔叶混交林 Broadleaved mixed forest	18	6.7–17.4	4.1–17.2	10–15
总计 Total	93	5.7–28.7	2.6–28.4	2–50

D, 胸径。

D, diameter at breast height.

于样地林分类型及其空间分布, 选择调查样地中的2/3实测数据作为建模集, 1/3作为验证集(图1)。

1.3 遥感数据的获取与分析处理

对应于样地实测调查时间, 考虑遥感数据的空间分辨率、时间分辨率及其数据的可获得性, 本研究选用2011年9月1日空间分辨率为30 m的Landsat陆地卫星ETM+影像(http://www.gscloud.cn/)为信息源。经过条带修复、几何校正、辐射和大气校正等预处理, 计算分析了*NDVI*、比值植被指数(*RVI*)、差值植被指数(*DVI*)以及土壤调整植被指数(*SAVI*)与修改型土壤调整植被指数(*MSAVI*) (张慧芳, 2008)。并且, 考虑了与植被特征、植被生长情况、地物区分有较大关系的波段的组合, 通过对其进行混合运算, 获得了TM2、TM3和TM4的数量和(简称: Band 234), TM3、TM4和TM5的数量和(简称: Band 345)等两种新的遥感参数, 一同作为备选的辅助参量。反演森林生物量模型的最佳辅助变量则是首先通过森林生物量和各辅助参量的相关性分析筛选出在双侧置信区间为95%水平上的相关显著参量, 然后, 对筛选出的参量进行逐步回归分析进而确定的。

另外, 结合不同林分光谱实测信息(采用Ava-Field-2便携式高光谱地物波谱仪(Avantes, Apeldoorn, Netherlands))、已有历史数据和森林分布专题图等辅助信息, 采用监督分类对所获得的遥感图像进行分类、解译, 获得研究区森林覆盖特别是樟林分的信息。

1.4 基于回归分析和反距离加权插值的生物量估测

首先, 对基于相关性分析预选的辅助变量, 通过回归分析优化确定最佳辅助变量, 并建立森林生物量的回归反演模型。其次, 计算各样地实测值与基于回归模型的估测值间的残差值。然后, 运用空间插值方法对估测和实测值的残差进行反距离加权插值(Burrough & McDonnell, 1998)。最后, 将回归估测的趋势项和残差的反距离加权估计值相加, 得到基于遥感和空间分析的区域森林生物量估测模型(以下简称为"回归反距离插值模型")以及生物量的最终估测值。

表2是分别采用62个森林样地实测数据和15个樟林样地实测数据建立的森林生物量和樟生物量最优回归模型。TM5、TM7与Band 345是通过相关分析筛选出在置信区间水平上的相关显著参量, 进一步逐步回归分析, 确定选用以TM5与Band 345为自变量的城市森林生物量遥感估测模型, 其决定系数(R^2)、校正决定系数(Adj-R^2)分别为0.46和0.44。在樟林样地实测数据与遥感辅助参量的相关性分析中, 筛选TM3、*NDVI*、*DVI*、*RVI*与*SAVI*为相关显著参量, 逐步回归分析后得到以*RVI*为自变量的樟林分生物量估测模型, 其R^2、Adj-R^2分别为0.56、0.52。进一步通过对实测样地的残差计算和空间分析, 得到基于遥感和空间分析的上海城市森林以及樟林分的生物量分布状况。

1.5 森林生物量模型的精度评价

为了对所构建的上海城市森林生物量遥感估测模型精度进行评价, 本研究通过对验证集中采样点的模型估测值进行提取, 计算分析了估测值与实测值之间的标准误差(*RMSE*)、平均相对误差(*MRE*)、平均绝对误差(*MAE*) (Pereira *et al*., 2010), 并对比分析了基于回归模型和基于回归反距离插值模型的森林生物量估测精度。

1.6 上海城市森林生物量总量估算

基于遥感解译获得的上海森林覆盖和樟林分的分布图, 对上海城市森林和樟林分相应有林信息进行提取, 得到上海地区城市森林(图2)及樟林分的生物量的空间分布图, 并分别计算分析研究区有林地部分和樟林分的生物量总量。

2 结果和分析

2.1 上海城市森林及樟林分生物量空间分布特征

2.1.1 上海城市森林生物量空间分布

由图2可见, 上海城市森林生物量密度主要分

表2 上海城市森林及樟林分生物量的回归模型
Table 2 Regression models for biomass in urban forests and *Cinnamomum camphora* trees in the Shanghai metropolis

	样地数 Number of plots	模型公式 Model equation	决定系数 Coefficient of determination	校正决定系数 Adjusted coefficient of determination
城市森林 Urban forest	62	$Y = 82.941–2.564* X_1+0.651* X_2$	0.46	0.44
樟 *Cinnamomum camphora*	15	$Y = 125.6*\exp(–0.833* X_3)$	0.56	0.52

X_1, TM5 (中红外波段反射率值); X_2, Band 345 (红色波段、近红外波段与中红外波段的反射率值之和); X_3, 比值植被指数(*RVI*); *Y*, 生物量。
X_1, mid-infrared reflectance values (TM5); X_2, the sum of reflectance values of red band, near-infrared and mid-infrared (Band 345); X_3, ratio vegetation index (*RVI*); *Y*, biomass.

doi: 10.17521/cjpe.2015.1102

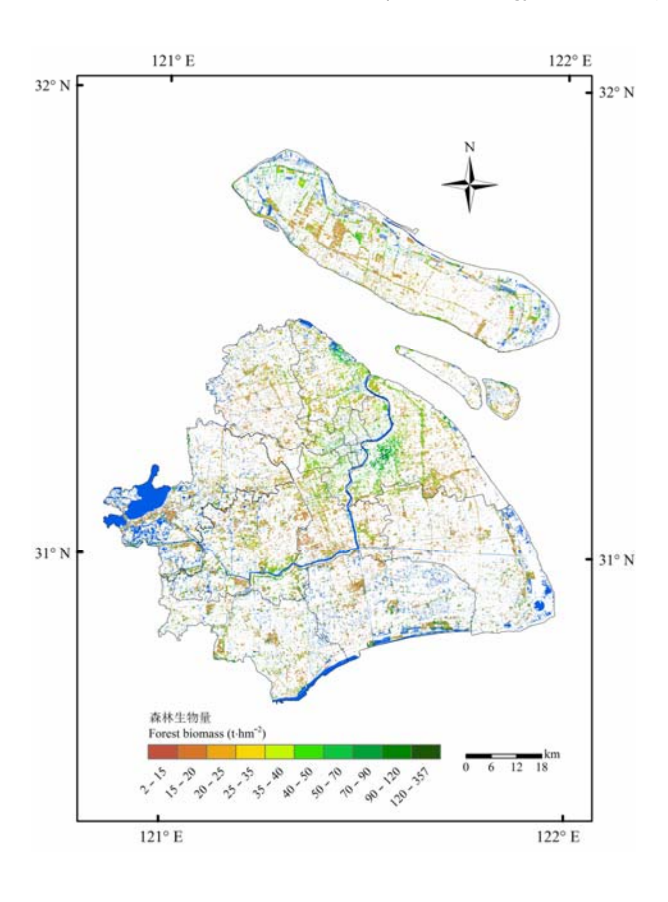


图2 上海城市森林生物量的空间分布图。
Fig. 2 Map of spatial distribution of urban forest biomass in the Shanghai metropolis.

布在15–120 $t\cdot hm^{-2}$之间。其中，静安区、黄浦区等中心城区生物量密度普遍较高，集中在35–70 $t\cdot hm^{-2}$之间，平均生物量密度为42.5 $t\cdot hm^{-2}$；嘉定区、青浦区等郊区生物量密度较低，集中在15–50 $t\cdot hm^{-2}$之间，平均生物量密度为32.9 $t\cdot hm^{-2}$。整体分布状况与2009年上海市森林资源规划设计调查(以下简称“二类调查”)中林地分布、植被林龄、栽植密度等实测的情况基本一致(http://cfdb.forestry.gov. cn:443/)，与史利江(2009)对上海土地利用中林地部分的变化结果、张庆费等(2001)对上海各区县公园分布及其面积与密度的研究结果基本吻合。

2.1.2 上海樟林分生物量空间分布

上海樟林分生物量密度主要分布在20–110 $t\cdot hm^{-2}$之间。生物量密度较高(60–110 $t\cdot hm^{-2}$)区域主要位于静安区、普陀区等中心城区；生物量密度较低(30–50 $t\cdot hm^{-2}$)的区域主要位于金山区、青浦区等郊区。除崇明县外，空间上呈现出东北部较高，西南部较低；中心城区高，郊区低；离市区越近生物量密度越高、越远生物量密度越低的趋势。空间上，崇明县南部较北部总体偏高。

2.2 森林生物量模型的精度评价

基于31个验证点的估测值与实测值，对比分析回归模型和回归反距离插值的上海城市森林生物量估测模型的*RMSE*、*MAE*和*MRE* (表3)。结果显示，相比回归模型，回归反距离插值模型的*RMSE*、*MAE*、*MRE*分别降低了57.69%、55.43%、64.00%。对樟林分生物量估测模型的精度分析显示，相比回归模型，回归反距离插值模型的*RMSE*、*MAE*、*MRE*分别降低了4.40%、17.83%、20.82%。显然，结合残差空间分析的森林生物量估测模型优于单纯的回归模型，具有更高的可信度，能更精准地对生物量进行估测。

进一步从研究区森林生物量的空间分布来看，基于多元线性回归模型的城市森林生物量密度主要集中在10–80 $t\cdot hm^{-2}$范围内(图3A)，空间分布较为均匀、没有太大的波动趋势。而研究区森林的残差值变化范围在–20–50 $t\cdot hm^{-2}$ (图3B)，残差较高区域主要位于浦东新区北部，且中心城区和宝山、松江、闵行等区的部分地区也有较高的残差分布；残差较低的区域主要分布于青浦、奉贤与浦东新区南部(原南汇区)等郊区。残差的空间分布大致呈现出东北部较高、西北与南部较低、中心城区偏高、郊区县偏低的总体趋势。其原因主要是基于回归模型进行森林生物量的估算，会低估诸如公园等森林生物量密度高区域的生物量、高估森林生物量密度较低区域

表3 基于回归模型和回归反距离插值的上海城市森林及樟林分生物量估测结果
Table 3 Results of evaluations on estimation of urban forest biomass and *Cinnamomum camphora* tree biomass based on regression model and combination of regression model and spatial analysis (IDW regression model) from validation sites in the Shanghai metropolis

	回归模型 Regression model			回归反距离插值模型 IDW regression model		
	标准误差 *RMSE*	平均绝对误差 *MAE*	平均相对误差 *MRE*	标准误差 *RMSE*	平均绝对误差 *MAE*	平均相对误差 *MRE*
城市森林 Urban forest	19.83	15.39	67.30%	8.39	6.86	24.22%
樟 *Cinnamomum camphora*	10.90	8.92	24.93%	10.42	7.33	19.74%

IDW, Inverse-distance weighting; *MAE*, average absolute error; *MRE*, average relative error; *RMSE*, root-mean-square error.

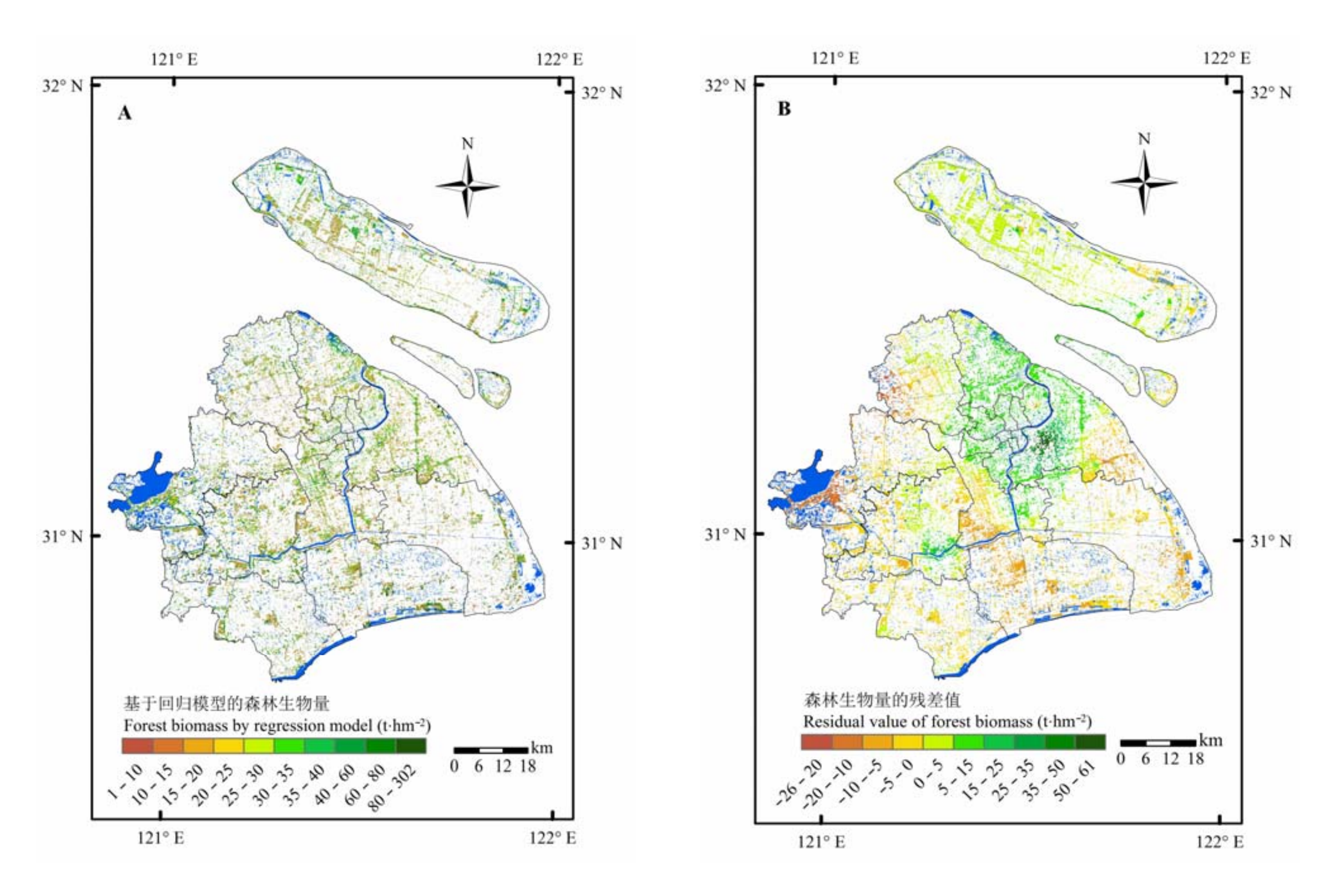


图3　基于回归模型的上海城市森林生物量的分布图(**A**)及其残差分布图(**B**)。
Fig. 3　Maps of spatial distribution of urban forest biomass based on regression model (**A**) and its residual (**B**) in the Shanghai metropolis.

的生物量。例如: 位于浦东新区的世纪公园, 作为大型城市公园其实测森林生物量密度约为121.51 t·hm^{-2}, 回归模型估测的结果仅为60.96 t·hm^{-2}, 残差值为60.55 t·hm^{-2}; 而位于青浦区的练塘镇样地, 实测生物量密度为10.32 t·hm^{-2}, 回归模型的估测结果为23.85 t·hm^{-2}, 残差值为–13.53 t·hm^{-2}。因此, 基于残差计算及其空间插值能对回归估测的结果进行有效的信息补充, 以提高城市森林生物量估测精度。

2.3　城市森林生物量及樟林分生物量总量

结合回归反距离插值模型和上海市森林覆盖遥感图像解译结果, 计算得到上海城市森林的平均生物量密度为33.37 t·hm^{-2}, 总量为3.57 Tg, 其中郊区县与中心城区森林生物量分别占总量的93.9%和6.1%。樟林分的平均生物量密度为48.31 t·hm^{-2}, 总量为1.33 Tg。上海樟林分生物量约占城市森林生物量总量的37.12%。

根据各区县森林生物量总量与2009年“二类调查”的林地面积图(图4), 各区县的林地面积与森林生物量总量具有较好的正相关性(http://cfdb.forestry.gov.cn:443/)。在所有区县中, 以林地面积最大的崇明县和浦东新区(分别占总林地面积的26.36%和19.24%)具有最高的森林生物量总量, 分别占总量的20.1%和19.18%; 而中心城区, 虽然林木林龄长、生长空间大、生长速度快, 且生物量密度高, 但随着城市的综合快速发展、土地的过度开发与利用, 建筑用地占据了很大的土地面积, 因此森林面积明显小于郊区县的森林面积(Ren *et al*., 2012; 朱婵瓔等, 2013), 森林生物量总量也就相对较低, 其中以林地面积最小的静安区(占总林地面积的0.07%)为最低, 仅占总量的0.11%, 各郊区县的森林生物量远高于中心城区中的各区。

3　结论和讨论

基于上海城市森林的分布特征, 利用回归分析建立了城市森林以及樟林分生物量遥感回归模型, 在对估测残差进行空间分析的基础上, 通过空间加

doi: 10.17521/cjpe.2015.1102

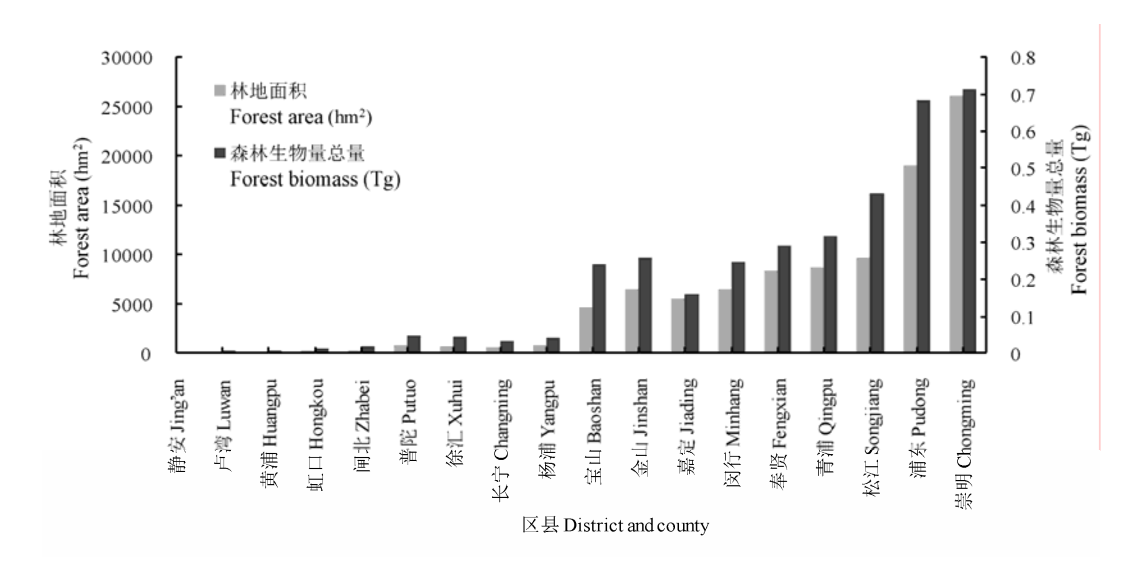


图4 上海各区县林地面积与森林生物量总量图。
Fig. 4 Chart of forest biomass and relative areas for different districts and counties in the Shanghai metropolis.

法运算实现对上海城市森林和樟林分生物量的估测分析。

(1)针对城市森林的分布特点, 在建立回归模型的基础上, 通过引入残差及其空间分析, 期望能减少由于城市森林生物量空间变异较强而引发的生物量估算的不确定性。本研究中残差的分布情况表明: 在基于遥感信息建立回归模型对森林生物量的估测中, 生物量的空间分布情况较为均匀, 残差的计算和分析能在一定程度上对回归建模的结果进行必要的信息补充, 以有效地提高模型估测精度, 从而对研究区森林生物量的分布情况做出更为客观的解释。在对城市森林生物量的估测过程中, 回归反距离插值模型的生物量密度主要集中在15–120 $t \cdot hm^{-2}$, 平均值为33.37 $t \cdot hm^{-2}$, 标准差为24.97。相比基于回归模型的生物量密度估测值(范围在10–80 $t \cdot hm^{-2}$, 平均值30.65 $t \cdot hm^{-2}$, 标准差15.69), 更加接近实际样地的生物量密度范围: 10–121 $t \cdot hm^{-2}$, 平均值33.36 $t \cdot hm^{-2}$, 标准差22.93。另外, 本研究也尝试了基于实测数据通过空间插值进行生物量的估测方法, 其生物量估测范围在5.74–121.5 $t \cdot hm^{-2}$, 平均值34.9 $t \cdot hm^{-2}$, 标准差13.29, *RMSE*、*MAE*和*MRE*分别为22.2、16.53和70%。本研究建立的基于回归反距离插值的生物量估测模型, 相比回归模型, 模型的*RMSE*、*MAE*、*MRE*分别降低了57.69%、55.43%、64.00%, 较空间插值的方法分别降低了62.21%、58.50%、65.40%。分析表明, 上海城市森林分布特点及其相应样地分布的不均匀是基于空间插值估测误差较大的主要原因。

(2)上海城市森林生物量总体呈现中心城区较高、郊区较低的分布特征(中心城区和郊区的平均生物量密度分别为42.5和32.9 $t \cdot hm^{-2}$)。这主要是由于中心城区具有较多林龄长、密度大的城市公园与公益涵养林, 林木的种植时间长, 栽植密度高, 胸径和树高都较大, 且大径阶树木所占比例高, 因此具有较高的生物量分布。例如, 位于中心城区的共青森林公园、杨浦公园、和平公园、复兴公园、上海动物园、上海植物园、黄兴公园等都已有几十年的历史。而嘉定、青浦、崇明等郊区县, 普遍都在2003年以后才进行大面积造林, 目前尚处于幼龄林快速生长阶段。例如: 2007年建成的滨江森林公园和顾村公园、2003年启动的黄浦江上游水源涵养林工程和2005年的崇明岛生态建设工程等。因此, 出现了城区林分的平均生物量密度总体大于郊区的情况。此外, 对崇明县而言, 虽然森林覆盖率较高, 但除了建园较早的东平国家森林公园(1993年)以及东滩自然保护区(1998年)具有较高的森林生物量分布外, 大多是种植时间较短的人工林地, 比中心城区的林木胸径小、树高低, 因此崇明县的森林生物量的分布情况较中心城区总体偏低。

另外, 在中心城区, 虽然林木生长空间大、生长速度快、生物量密度高, 但随着城市的综合快速发展, 土地的过度开发与利用, 建筑用地占据了很大

的土地面积, 有限的中心城区范围内森林面积明显小于郊区县的森林面积, 其林地面积分别占总量的3.82%和96.18% (2009年“二类调查”)。因而, 本研究计算得到的中心城区总的森林生物量只占总量的6.1%, 郊区森林生物量占到93.9%。

(3)作为上海城市森林的优势树种, 樟纯林占上海林地总面积的27.7%, 生物量空间分布中心城区较高, 郊区较低。本研究在基于样地调查的基础上, 特别进行了光谱特征的信息采集和分析, 一方面用于回归模型的建立, 另外结合森林资源清查信息, 进行樟林分信息的遥感解译和提取。但由于各类信息源的局限, 模型精度有待进一步提高。分析表明, 高分和高光谱信息的应用以及实测样地的增多将是提高樟林分生物量估测精度的有效手段。

总之, 在基于遥感信息的城市森林生物量估测中, 不同样地的设置, 由于其树种、林龄以及土壤、阴影和地理环境等背景方面的差异, 会导致遥感信息比如植被指数或波段反射率等与生物量之间的相关性受到影响, 综合集成空间信息和光谱信息是提高遥感估测森林生物量精度和可靠性的有效途径之一(Lu, 2006)。本研究引入残差计算和空间分析, 是对基于遥感进行城市森林生物量估测方法的尝试, 更为有效和高精度的城市森林生物量监测有待更多其他信息源如高分或高光谱信息或改善残差空间分析方法来获得。

基金项目 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0505020 401)、上海市农业委员会上海森林生态系统的碳储量估测研究项目(沪农科攻2010-6-1)、国家自然科学基金(71333010)和基于高分一号卫星和无人飞机光谱数据的上海城市森林碳储量估测(Agri-X2015004)。

致谢 感谢上海市林业总站在野外采样及实测数据整理工作中给予的帮助。

参考文献

Antonarakis AS, Saatchi SS, Chazdon RL, Moorcroft PR (2011). Using Lidar and Radar measurements to constrain predictions of forest ecosystem structure and function. *Ecological Applications,* 21, 1120–1137.

Asner GP, Mascaro J, Muller-Landau HC, Vieilledent G, Vaudry R, Rasamoelina M, Hall JS, van Breugel M (2012). A universal airborne LiDAR approach for tropical forest carbon mapping. *Oecologia,* 168, 1147–1160.

Barbosa JM, Broadbent EN, Bitencourt MD (2014b). Remote sensing of aboveground biomass in tropical secondary forests: A review. *International Journal of Forestry Research,* 2014, 1–14.

Barbosa JM, Melendez-Pastor I, Navarro-Pedreño J, Bitencourt MD (2014a). Remotely sensed biomass over steep slopes: An evaluation among successional stands of the Atlantic Forest, Brazil. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 88, 91–100.

Burrough PA, McDonnell RA (1998). *Principles of Geographical Information Systems.* 2nd ed. Oxford University Press, Oxford, UK.

Eckert S, Ratsimba HR, Rakotondrasoa LO, Rajoelison LG, Ehrensperger A (2011). Deforestation and forest degradation monitoring and assessment of biomass and carbon stock of lowland rainforest in the Analanjirofo region, Madagascar. *Forest Ecology and Management,* 262, 1996–2007.

Hall FG, Bergen K, Blair JB, Dubayah R, Houghton R, Hurtt G, Kellndorfer J, Lefsky M, Ranson J, Saatchi S, Shugarti HH, Wicklande D (2011). Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements. *Remote Sensing of Environment,* 115, 2753–2775.

Liu CF, He XY, Chen W, Zhao GL, Li L, Xu WD (2008). Ecological benefit evaluation of urban forests in Shenyang City based on QuickBird image and CITYgreen model. *Chinese Journal of Applied Ecology,* 19, 1865–1870. (in Chinese with English abstract) [刘常富, 何兴元, 陈玮, 赵桂玲, 李玲, 徐文铎 (2008). 基于QuickBird和CITYgreen的沈阳城市森林效益评价. 应用生态学报, 19, 1865–1870.]

Liu SN, Zhou T, Shu Y, Dai M, Wei LY, Zhang X (2012). The estimating of the spatial distribution of forest biomass in China based on remote sensing and downscaling techniques. *Acta Ecologica Sinica,* 32, 2320–2330. (in Chinese with English abstract) [刘双娜, 周涛, 舒阳, 戴铭, 魏林艳, 张鑫 (2012). 基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布. 生态学报, 32, 2320–2330.]

Lu DS (2006). The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing,* 27, 1297–1328.

Manna S, Nandy S, Chanda A, Akhand A, Hazra S, Dadhwal VK (2014). Estimating aboveground biomass in *Avicennia marina* plantation in Indian Sundarbans using high-resolution satellite data. *Journal of Applied Remote Sensing,* 8, 1–12.

Pereira P, Oliva M, Baltrenaite E (2010). Modelling extreme precipitation in hazardous mountainous areas. Contribution to landscape planning and environmental management. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management,* 18, 329–342.

Ren Y, Yan J, Wei XH, Wang YJ, Yang YS, Hua LZ, Xiong YZ, Niu X, Song XD (2012). Effects of rapid urban sprawl

on urban forest carbon stocks: Integrating remotely sensed, GIS and forest inventory data. *Journal of Environmental Management*, 113, 447–455.

Shen LY (2008). *Studies and Assessments on Vegetation Characteristics in Urban Forests of Shanghai*. PhD dissertation, Nanjing Forestry University, Nanjing. (in Chinese with English abstract) [沈烈英 (2008). 上海城市森林的植被特征与综合评价研究. 博士学位论文, 南京林业大学, 南京.]

Shi LJ (2009). *The Research on LUCC and Soil Organic Carbon Pool of Shanghai Based on RS and GIS*. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [史利江 (2009). 基于遥感和GIS的上海土地利用变化与土壤碳库研究. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]

Wang C, Qi J (2008). Biophysical estimation in tropical forests using JERS-1 SAR and VNIR imagery. II. Aboveground woody biomass. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 6827–6849.

Wang Z (2012). *Studies on Carbon Stock in Shanghai Urban Forest*. PhD dissertation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [王哲 (2012). 上海城市森林碳储量研究. 博士学位论文, 上海交通大学, 上海.]

Wang Z, Cui X, Yin S, Shen GR, Han YJ, Liu CJ (2013). Characteristics of carbon storage in Shanghai's urban forest. *Chinese Science Bulletin*, 58, 1130–1138.

Woodwell GM, Whittaker RH, Reiners WA, Likens GE, Delwiche CC, Botkin DB (1978). The biota and the world carbon budget. *Science*, 199, 141–146.

Xu F, Liu WH, Ren WL, Zhong QC, Zhang GL, Wang KY (2010). Effects of community structure on carbon fixation of urban forests in Shanghai, China. *Chinese Journal of Ecology*, 29, 439–447. (in Chinese with English abstract) [徐飞, 刘为华, 任文玲, 仲启铖, 张桂莲, 王开运 (2010). 上海城市森林群落结构对固碳能力的影响. 生态学杂志, 29, 439–447.]

Xu XL, Cao MK (2006). An analysis of the applications of remote sensing method to the forest biomass estimation. *Geo-Information Science*, 8, 122–128. (in Chinese with English abstract) [徐新良, 曹明奎 (2006). 森林生物量遥感估算与应用分析. 地球信息科学, 8, 122–128.]

Zhang HF (2008). *Remotely Sensed Inversion of Forest Biomass and Its Temporal and Spatial Distribution Patterns Dynamics in Beijing*. Master degree dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. (in Chinese with English abstract) [张慧芳 (2008). 北京地区森林植被生物量遥感反演及时空动态格局分析. 硕士学位论文, 北京林业大学, 北京.]

Zhang KX (2010). *Study on Community Ecology of Shanghai Green Belt and Ecological Benefits and Aesthetics Assessment of Its Plant Communities*. PhD dissertation, East China Normal University, Shanghai. (in Chinese with English abstract) [张凯旋 (2010). 上海环城林带群落生态学与生态效益及景观美学评价研究. 博士学位论文, 华东师范大学, 上海.]

Zhang QF, Xia L, Qiao P, Yang WY (2001). Development dynamic, distribution pattern and scale characters of the parks system in Shanghai. *Journal of Chinese Landscape Architecture*, (1), 58–61. (in Chinese with English abstract) [张庆费, 夏檑, 乔平, 杨文悦 (2001). 上海公园的发展动态、分布格局与规模特征分析. 中国园林, (1), 58–61.]

Zhu CY, Wang RH, Chen DQ (2013). Urban forest ecosystem NPP and carbon storage based on the casa model in Nanjing. *China Forestry Science and Technology*, 27(3), 53–56. (in Chinese with English abstract) [朱婵璎, 王让会, 陈东强 (2013). 南京城市森林生态系统生产力与碳储量的计算. 林业科技开发, 27(3), 53–56.]

Zhu XL, Liu DS (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 222–231.

特邀编委: 黄 玫 责任编辑: 王 葳